

Effet des systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV) sur le stockage de carbone et la macrofaune d'un Sol ferrallitique (Cerrados, Brésil)

E. Blanchart⁽¹⁾, M. Bernoux⁽¹⁾, M. Siqueira Neto⁽²⁾, C. C. Cerri⁽²⁾, M. Piccolo⁽²⁾,
J.M. Douzet⁽³⁾, E. Scopel⁽⁴⁾ et C. Feller⁽¹⁾

1 Institut de Recherche pour le Développement IRD, UMR Eco&Sols (Ecologie Fonctionnelle & Biogéochimie des Sols, UMR 210), INRA-IRD-SupAgro, 2 Place Viala (Bat. 12), F-34060 Montpellier cedex 1, France.

2 CENA-USP, Lab. Biogeoquímica Ambiental, CP 96, 13400-970 Piracicaba, SP, Brésil

3 CIRAD, URP SCRID, SRR FOFIFA, BP 230, Antsirabe, Madagascar

4 CIRAD-CA, EMBRAPA-CPAC, Km 18, BR 020 - Rodovia Brasília/Fortaleza, CP 08223, CEP 73301-970, Planaltina, Brésil

RÉSUMÉ

Les sols représentent un compartiment important de carbone (environ 1 500 Gt), équivalent à trois fois la quantité stockée dans la biomasse terrestre et deux fois la quantité stockée dans l'atmosphère. Toute modification d'utilisation ou de gestion des terres entraîne généralement des variations dans les stocks de carbone (C) du sol. Ces modifications affectent aussi la macrofaune du sol (densité, biomasse, diversité) qui affecte elle-même la dynamique du C du sol.

Les systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV), sans travail du sol et avec deux cultures par an, ont été largement adoptés dans les Cerrados (région centrale du Brésil) au cours des 10 dernières années. Ils ont remplacé les monocultures traditionnelles de soja avec jachère, sous travail du sol conventionnel (CT). L'objectif de cette étude est d'examiner comment les pratiques SCV affectent la dynamique du C et la macrofaune du sol (Rio Verde, Etat de Goiás). Les stocks de C et la macrofaune d'un Sol ferrallitique argileux ont été étudiés, en mode synchronique, dans sept parcelles : une savane arborée de Cerrado (CER), un système conventionnel CT de 25 ans après défrichement de la savane arborée, cinq parcelles en SCV âgées de 1, 5, 8, 11 et 13 ans derrière cultures en systèmes CT depuis 24, 20, 17, 14 et 12 années. Chaque parcelle est donc cultivée depuis 25 ans.

On constate que le taux moyen annuel de stockage du C est compris, selon le mode de calcul, entre 1,3 et 1,6 MgC ha⁻¹, ce qui est dans la gamme des valeurs observées pour les SCV dans différentes zones du Brésil (0,4 à 1,7 MgC ha⁻¹ an⁻¹).

Comparée à la savane arborée, la macrofaune du sol dans les systèmes cultivés a été très modifiée. Dans la parcelle CT, la densité, la biomasse et la biodiversité sont faibles et nettement inférieures aux valeurs relevées pour les parcelles CER et SCV. Avec l'âge croissant des SCV, la densité de la macrofaune augmente jusqu'à 8 ans puis diminue ensuite tandis que la biomasse augmente continuellement en raison d'une forte croissance de celle des larves de Coléoptères Scarabeidae. Ces modifications de densités et biomasses de

macrofaune sont discutées en relation avec la dynamique du C du sol (décomposition, minéralisation et protection physique).

Mots clés

Brésil, Cerrados, savane arborée, stockage de carbone, vers de terre, larves de coléoptères.

SUMMARY

EFFECT OF DIRECT SEEDING MULCH-BASED CROPPING SYSTEMS (SCV) ON ORGANIC CARBON STORAGE AND MACROFAUNA OF AN OXISOL (CERRADOS, BRAZIL)

Soils represent a large carbon pool, approximately 1500 Gt, equivalent to almost three times the quantity stored in terrestrial biomass and twice the amount stored in the atmosphere. Any modification of land-use or land management can induce variations in soil carbon stocks, even in agricultural systems that are perceived to be in a steady state. These modifications also alter soil macrofauna that is known to affect soil carbon dynamics.

Direct seeding Mulch-based Cropping (SCV) systems with two crops per year without soil tillage have widely been adopted over the last 10 to 15 years in the Cerrado (central region) of Brazil. They are replacing the traditional soybean monocropping with fallow under conventional tillage (CT). The objective of this study was to examine how SCV practices affect soil organic carbon (SOC) dynamics and macrofauna (Rio Verde, Goiás State). The approach was to determine soil C stocks and macrofauna in five fields under SCV aged 1, 5, 7, 11 and 13 years. To able comparison with the native system of the region and previous land-use, a situation under native Cerrado (tree-savanna like vegetation) and a field conducted traditionally (CT) were also studied.

In our study, the annual rate of carbon storage was equal to ca. 1.6 MgC ha⁻¹, which is in the range of values measured for SCV in different areas of Brazil, i.e., 0.4 to 1.7 MgC ha⁻¹ yr⁻¹.

Compared to natural vegetation, soil macrofauna in cropped systems was strongly modified. In CT, biomass and density were very low and much lower than in SCV systems. With increasing age of SCV, total macrofauna density increased and then decreased while total macrofauna biomass continuously increased due to a strong increase in Coleoptera larvae biomass. These modifications in macrofauna density and biomass are discussed with regard to soil SOC dynamics (decomposition, mineralization and physical protection).

Key-words

Brazil, Cerrados, tree savannah, carbon storage, earthworms, coleopteran larvae.

RESUMEN

EFFECTO DE LOS SISTEMAS DE SIEMBRA DIRECTA BAJO COBERTURA VEGETAL (SCV) SOBRE EL ALMACENAMIENTO DEL CARBONO Y LA MACROFAUNA DE UN SUELO FERRALÍTICO (CERRADOS, BRASIL)

Los suelos representan un compartimento importante de carbono (próximamente 1 500 Gt), que equivale a tres veces la cantidad almacenada en la biomasa terrestre y dos veces la cantidad de carbono almacenada en la atmósfera. Toda modificación de uso o de gestión de las tierras implica generalmente variaciones en los stocks de carbono (C) del suelo. Estas modificaciones afectan también la macrofauna del suelo (densidad, biomasa, diversidad) que afecta ella misma la dinámica del C del suelo.

Los sistemas de siembra directa bajo cubierta vegetal (SCV), sin trabajo del suelo y con dos cultivos al año, fueron largamente adoptados en los Cerrados (región central de Brasil) a lo largo de los diez últimos años. Reemplazaron los monocultivos de soja con barbechos, bajo trabajo convencional del suelo (CT). El objetivo de este estudio está examinar como las practicas SCV afectan la dinámica del carbono y la macrofauna del suelo (Río verde, estado de Goiás). Se estudiaron los stocks de C y la macrofauna de un suelo ferralítico arcilloso, en modo sincrónico, en siete parcelas: una sabana arbórea de Cerrado (CER), un sistema convencional CT de 25 años después del desmonte de la sabana arbórea, cinco parcelas en SCV de edad 1, 5, 8, 11 y 13 después de cultivos en sistemas CT desde 24, 20, 17, 14 y 12 años. Se cultiva cada parcela durante 25 años.

Se constata que la tasa media de almacenamiento del C está comprendida entre 1,3 y 1,6 MgC ha⁻¹, lo que está dentro de la gama de valores observadas para los SCV en diferentes zonas de Brasil (0,4 a 1,7 MgC ha⁻¹ año⁻¹).

Comparada a la sabana arbórea, se modificó mucho la macrofauna del suelo en los sistemas cultivados. En la parcela CT, la densidad, la biomasa están pequeñas y netamente inferiores a los valores relevados para las parcelas CER y SCV. Con la edad creciente de SCV, la densidad de la macrofauna aumenta hasta los 8 años y disminuye después, mientras que la biomasa aumenta continuamente en razón de un fuerte crecimiento de la de las larvas de Coleópteros Scarabeidae. Se discutan estas modificaciones de densidades y biomasa de macrofauna en relación con la dinámica del C del suelo (descomposición, mineralización y protección física).

Palabras clave

Brasil, Cerrados, sabana arbórea, almacenamiento del carbono, lombrices, larvas de coleópteros.

D'un point de vue global, les sols représentent un important stock terrestre de carbone (C) organique¹ équivalent approximativement à trois fois le C de la végétation et deux fois le C de l'atmosphère (Amundson, 2001). Pour un sol et un climat donnés le stock de carbone organique du sol (COS) est fortement dépendant du mode d'occupation du sol et des pratiques culturales. Ainsi, le défrichement, le changement d'utilisation des terres, des pratiques de culture inappropriées et le changement climatique peuvent conduire à une perte nette de COS vers l'atmosphère, exacerbant les problèmes de libération de gaz à effet de serre (GES). La perte mondiale de COS a été estimée à 90 Pg (Lal, 2002). L'essentiel de cette perte est le résultat de la conversion d'écosystèmes natifs, comme les forêts, en systèmes cultivés. Depuis longtemps, cette diminution de COS est connue comme étant un processus majeur de dégradation du sol dans les environnements tropicaux (Nye & Greenland 1960). Le COS est aussi un déterminant majeur de la fertilité des sols, de la capacité de rétention en eau et de l'activité biologique, et est fortement corrélé à la biodiversité souterraine ou épigée (Carter 2002).

Les Cerrados ou savanes tropicales du Centre du Brésil occupent environ 23 % du territoire national, soit environ 2 millions de km² (Ab'Saber, 1971). Une rapide expansion de l'agriculture commerciale a pris place dans les Cerrados à partir des années 70, soutenue par un ensemble de politiques gouvernementales souhaitant produire des denrées pour l'exportation (Klink *et al.*, 1993). Les principales cultures de cette région sont le soja, le maïs, le riz et le haricot; elles sont menées de façon traditionnelle avec des pratiques de travail du sol conventionnel et l'utilisation de charrue à disque. Depuis 10 à 15 ans, beaucoup d'agriculteurs ont abandonné leurs pratiques conventionnelles avec labour (CT ou Conventional Tillage) pour adopter les pratiques de non-travail (NT ou No-Tillage) avec un semis direct dans un paillis (mulch) de résidus de plantes (systèmes dits « SCV »). Aujourd'hui, environ 6 millions d'ha de terres sont en SCV dans les Cerrados. Le contrôle de l'érosion a été la principale raison du passage des systèmes CT aux systèmes SCV; une autre raison a été la réduction du temps de travail et des coûts. À partir du début des années 90, le taux d'expansion des SCV dans la région des Cerrados est devenu supérieur à celui du reste du Brésil (Bernoux *et al.*, 2006).

Récemment, une grande attention a été portée aux systèmes de culture alternatifs comme moyens de réduire les émissions agricoles de CO₂ (Paustian *et al.*, 1997; Follet, 2001). Les systèmes SCV représentent un potentiel pour le stockage de COS en augmentant les apports de C au sol, en diminuant les taux de décomposition du COS par l'absence de perturbation mécanique

du sol et en réduisant les pertes en C dues à l'érosion. De plus, dans les conditions brésiliennes, la possibilité d'une date de semis précoce grâce au semis direct offre souvent la possibilité d'un deuxième cycle de culture d'une plante commerciale ou d'une plante de couverture. En conséquence, une plus grande quantité de biomasse est retournée au sol chaque année. Bernoux *et al.* (2006) ont synthétisé l'information disponible et rapportent que la plupart des études donnent des taux de stockage de carbone dans les 40 premiers cm de sol compris entre 0,4 et 1,7 t C ha⁻¹ par an, avec les taux les plus élevés pour les Cerrados.

Comme il a été dit ci-dessus, la matière organique du sol (MOS) est un déterminant majeur de l'activité biologique. Les sols non travaillés sont généralement caractérisés par des densités plus élevées d'organismes, et plus spécialement de microorganismes. Seules quelques études ont considéré l'effet des SCV sur la macrofaune du sol ou sur le rôle fonctionnel de la macrofaune dans les SCV (Marasas *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2002; Blanchart *et al.*, 2006). La macrofaune du sol est aussi connue pour contrôler la plupart des fonctions du sol: dynamique de la MO, libération de nutriments, structure du sol et propriétés physiques associées (Lavelle & Spain, 2001; Blanchart *et al.*, 2004). Elle peut ainsi avoir un effet important sur le stockage du COS en (i) incorporant la litière dans le sol, (ii) mélangeant la MOS à la matière minérale et (iii) formant des macro-agrégats stables qui peuvent protéger le MOS contre la minéralisation.

Toute modification de l'utilisation ou de la gestion des terres peut induire des variations des stocks de MOS (donc de COS) et de densité, diversité et activité de la macrofaune du sol. L'objectif de cette étude est d'analyser, pour les Cerrados brésiliens, l'effet des SCV sur la double dynamique du COS et de la faune du sol. Pour ce faire, on s'appuie sur une chronoséquence de parcelles cultivées dont les durées en SCV varient de 1 à 13 ans. Ces parcelles ont été comparées à la végétation naturelle et à une parcelle labourée de façon traditionnelle (CT).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Sites d'étude

Le site d'étude est localisé près de la ville de Rio Verde (17° 47' S, 51° 55' W) sur un plateau (750 m d'altitude) dans la partie sud-est de l'état de Goiás, au centre de la région des Cerrados. Le climat est de type tropical humide de type savane. Les précipitations annuelles sont d'environ 1600 mm, avec une saison sèche de mai à septembre. L'évapotranspiration potentielle est constante tout au long de l'année avec une moyenne annuelle totale de 1500 mm. Les températures minimales et maximales moyennes pendant la saison de croissance sont respectivement de 17 et 27 °C. Le site d'étude couvre environ 5000 ha de terres cultivées installées sur la savane naturelle depuis plus de 25 ans. Les premières cultures consistaient en des monocultures de soja

¹ Le carbone organique du sol (COS) est présent sous forme de matière organique du sol (MOS) et représente environ 50 % de celle-ci. Aussi, par commodité de langage lorsqu'il sera question dans ce texte de COS, il s'agira en fait, physiquement, de la partie carbonée de la MOS.

avec une période de jachère et l'utilisation de charrue à disque pour le travail du sol. La profondeur du travail du sol était généralement inférieure à 15 cm et la plus grande partie des résidus était enfouie dans le sol. Les premiers SCV ont été introduits dans la région en 1990. Les SCV impliquent une absence de travail du sol et l'introduction d'une plante de couverture (millet) ou d'une seconde culture commerciale (maïs ou sorgho) après la culture principale (soja ou maïs).

Cinq champs ont été sélectionnés pour représenter une chronoséquence de SCV en continu de 1 à 13 ans: 1, 5, 8, 11 et 13 ans. Celle-ci est complétée par une parcelle sous végétation native de Cerrado (CER) et une parcelle cultivée traditionnellement avec labour (CT). Toutes les situations sont sur le même type de sol (Geri-Gibbsic Ferralsol, Classification FAO), et sur une même topographie, avec une teneur en argile + limon fin de la couche 0-20 cm comprise entre 531 (CER) et 719 (SCV13) g kg⁻¹ sol. Le pH (eau) varie de 5,5 à 5,9 pour toutes les situations cultivées et est de 4,8 pour la situation sous végétation native.

Mesures des stocks de carbone du sol

Les stocks de carbone du sol ont été mesurés en octobre 2003. Pour chaque situation, le sol a été échantillonné dans 18 fosses de dimension 50x50x60 cm, et récolté avec des cylindres à cinq profondeurs: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm. Les échantillons de sol ont été séchés à l'air et tamisés à 150 µm pour la détermination du COS total par combustion sèche (analyseur de carbone LECO® CR-2000). Pour chaque échantillon, la densité apparente (DA) a été déterminée en pesant la masse de sol échantillonné et après détermination de l'humidité du sol.

A partir des teneurs en COS et des DA des différentes couches de sol prélevées de 0 à 40 cm, les quantités de COS stockées ont été calculées en « équivalent massique » selon Ellert & Bettany (1995) et Ellert *et al.* (2002) pour les premiers 400 kg.m⁻² de sol (ou 4000 Mg.ha⁻¹).

Échantillonnages de macrofaune du sol

La macrofaune du sol a été échantillonnée en janvier 2004 au milieu de la saison des pluies. Pour chaque situation, neuf monolithes de sol (25 x 25 x 30 cm) ont été sortis de la parcelle après avoir prélevé la litière en surface et creusé une tranchée autour de chaque monolithe (méthode TSBF modifiée; Anderson & Ingram, 1993). Les neuf monolithes de sol par parcelle ont été localisés le long d'un transect à 10 m d'intervalle entre deux monolithes. Les six premiers monolithes de sol ont été coupés en trois couches horizontales (0-10, 10-20 et 20-30 cm), et les invertébrés visibles à l'œil nu ont été triés à la main avant d'être placés dans un mélange alcool/formol. Dans les trois derniers monolithes, la macrofaune a seulement été échantillonnée dans la couche 0-10 cm. Au laboratoire, les invertébrés ont été identifiés au niveau ordre/famille puis comptés et pesés. Les densités (ind.m⁻²) et les biomasses (g.m⁻²) ont été calculées.

Analyses statistiques

Les résultats ont été analysés avec le logiciel Statistica 6 Software (Statsoft France, 2001). Des analyses statistiques descriptives classiques ont été réalisées pour l'étude des différentes populations. Des analyses de variance uni- et multi-latérales ont été réalisées pour identifier les effets significatifs ou non significatifs des variables. Des comparaisons de moyennes ont été réalisées grâce au test Tukey HSD (Honest Significant Difference).

RÉSULTATS

Stocks de carbone du sol

La densité apparente (DA) du sol varie de 0,87 à 1,28 Mg.m⁻³, avec une moyenne de 1,13 Mg.m⁻³ (*tableau 1*). La DA montre des différences significatives à la fois entre les profondeurs étudiées et entre les systèmes étudiés; ce qui justifie la nécessité de calculer les stocks de C sur une base massique. La DA de la couche 0-5 cm est significativement différente de celle de la couche 5-10 cm et ces valeurs sont différentes d'un troisième groupe homogène constitué par les couches plus profondes. Les groupes homogènes pour les différentes utilisations des terres sont donnés dans le *tableau 1*. On constate que les situations SCV1, SCV5 et SCV8 ont en moyenne des DA significativement plus élevées que les situations CER, CT, SCV11 et SCV 13.

Les stocks de C du sol ont été calculés pour chaque couche prélevée et sont présentés dans le *tableau 2*. Pour la couche 0-20 cm, les stocks les plus élevés sont ceux de CER, ils diminuent pour CT et SCV1 puis s'accroissent globalement avec l'âge des SCV. Les variations sont plus faibles pour la couche 20-40 cm. Ces valeurs sont dans la gamme des valeurs observées pour cette région et ce type de sol (Bernoux *et al.*, 2002).

Les stocks de C établis pour les premiers 400 kg.m⁻² de sol sont présentés sur la *figure 1*. Les stocks de C varient de 54,0 Mg C.ha⁻¹ pour SCV1 à 78,8 Mg C.ha⁻¹ pour SCV13 montrant une augmentation régulière avec l'âge du SCV. L'écart-type associé (barres sur la *figure 1*) varie de 3,5 à 5,1, excepté pour la situation native (stock moyen de 75,2 Mg C.ha⁻¹ mais avec un écart-type de 7,8 et des valeurs minimale et maximale respectivement de 58 et 90 Mg C.ha⁻¹).

Le taux d'accumulation de C sous les SCV a été calculé sur la base de l'âge de la parcelle exprimé en années après le dernier travail du sol conventionnel (*figure 2*). Pour ce calcul, la parcelle CT (travail du sol conventionnel) a été considérée avec un âge de 0 mois. L'augmentation moyenne annuelle calculée par cette méthode pour cette chronoséquence est de 1,6 Mg C.ha⁻¹. an⁻¹. Toutefois, il a été mesuré que les stocks initiaux des sols de chaque parcelle étaient sensiblement différents entre eux lors du passage de CT à SCV. La prise en compte de cette correction

Tableau 1: Densité apparente moyenne (Mg.m^{-3} , $n = 18$) pour les différentes couches de sol et pour les différentes situations, Légende: CER = végétation naturelle (Cerrado), CT = labour conventionnel, SCV = Semis direct sous couverture végétale; le nombre suivant SCV indique l'âge de la parcelle (en années).

Table 1: Mean bulk density (Mg.m^{-3} , $n = 18$) for the different soil layers and situations, Legend: CER = native vegetation (Cerrado), CT = conventional tillage, SCV = direct seeding mulch-based cropping systems; the number associated to SCV indicates the age of the SCV plot (in years).

Couche (cm)	CER	CT	SCV1	SCV5	SCV8	SCV11	SCV13
0 - 5	0,87	1,03	1,15	1,13	1,11	0,97	0,96
5 - 10	1,01	1,11	1,20	1,17	1,20	1,04	1,04
10 - 20	1,19	1,14	1,22	1,18	1,28	1,11	1,11
20 - 30	1,20	1,13	1,26	1,19	1,22	1,07	1,10
30 - 40	1,23	1,11	1,24	1,17	1,26	1,05	1,09
Moyenne	1,10a	1,10a	1,21b	1,17c	1,22b	1,05d	1,06d

¹ Des lettres différentes indiquent des différences significatives ($P < 0,05$) d'après le test de Tukey HSD.

Tableau 2: Stocks moyens de carbone du sol (Mg C.ha^{-1} , $n=18$) pour les différentes couches et pour les différentes situations étudiées (Légende voir tableau 1).

Table 2: Mean soil carbon stocks (Mg C.ha^{-1} , $n=18$) for the different studied soil layers and situations (Legend see table 1).

Couche (cm)	CER	CT	SCV1	SCV5	SCV8	SCV11	SCV13
0-5	15,6	9,8	9,8	10,9	12,5	12,0	13,3
5-10	12,5	10,1	9,1	9,8	10,6	10,7	11,6
10-20	21,4	18,3	16,2	17,5	21,9	21,1	23,1
20-30	17,9	15,5	15,0	15,6	16,3	18,1	18,8
30-40	14,3	14,1	13,3	13,4	14,1	15,8	16,8
0-20	49,5	38,2	35,1	38,2	45,0	43,8	48,0
0-40	81,7	67,8	63,4	67,2	75,4	77,7	83,6

conduit alors à une valeur plus faible de stockage moyen annuel, d'environ $1,3 \text{ Mg C.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (résultats Bernoux non publiés, adaptés de Siqueira, 2006).

Macrofaune du sol

Dans CER, 11 groupes taxonomiques de macrofaune ont été récoltés. La parcelle cultivée la plus diversifiée est SCV1 avec 12 groupes et la moins diversifiée est CT avec seulement 8 groupes taxonomiques (Mollusques, Dermaptères, Isopodes, Lépidoptères, Homoptères et Hémiptères sont absents de cette parcelle).

Un nombre total de 5449 individus a été récolté dans les monolithes de sol pour les sept situations: 1352, 124, 673, 902, 1409, 432, 557 respectivement dans CER, CT, SCV1, SCV5, SCV8, SCV11, SCV13. Les principaux taxons sont les termites (36 % des individus récoltés), les fourmis (32 %), les Coléoptères (14 %) et les vers de terre (11 %).

Les densités moyennes sont égales à 3258, 232, 1430, 1935, 2846, 793 et 1069 ind.m^{-2} , respectivement dans CER, CT, SCV1,

SCV5, SCV8, SCV11 et SCV13 (figure 3). Les termites sont les invertébrés les plus abondants dans le sol de CER (82 % de la communauté totale), dans CT (61 %), dans SCV1 (61 %) et dans SCV5 (52 %). Les fourmis sont dominantes dans SCV8 (80 %) et dans SCV13 (37 %) tandis que les Coléoptères le sont dans SCV11 (41 %). Les densités de vers de terre varient de 23 (CER) à 322 (SCV5) ind.m^{-2} . Chacun des autres groupes taxonomiques représente moins de 3 % des individus, exceptés les myriapodes (jusqu'à 6 % dans SCV5). Selon que l'on considère les 6 monolithes échantillonnés à 0-30 cm ou les 9 blocs échantillonnés à 0-10 cm, il existe des corrélations significatives ($P < 0.05$) et positives entre la densité des vers de terre et celle des Coléoptères, et entre la densité des vers de terre et celle des myriapodes. Des différences significatives sont observées entre les situations pour les vers de terre dont la densité est supérieure pour SCV5 à celle de CT ($P < 0.05$), pour les Coléoptères dont la densité est supérieure pour SCV11 à celle dans CT ($P < 0.05$), et pour les fourmis dont la densité est supérieure pour SCV8 à celle de toutes les autres situations. Considérant la moyenne de toutes les situations SCV,

Figure 1 : Stocks de carbone calculés sur une base massique du sol (premiers 400 kg.m⁻² de sol) dans les différentes situations étudiées (Légende voir tableau 1).

Figure 1 : Carbon stocks in the different studied situations calculated on an equivalent mass basis of the first soil 400 kg.m⁻² (Legend see table 1).

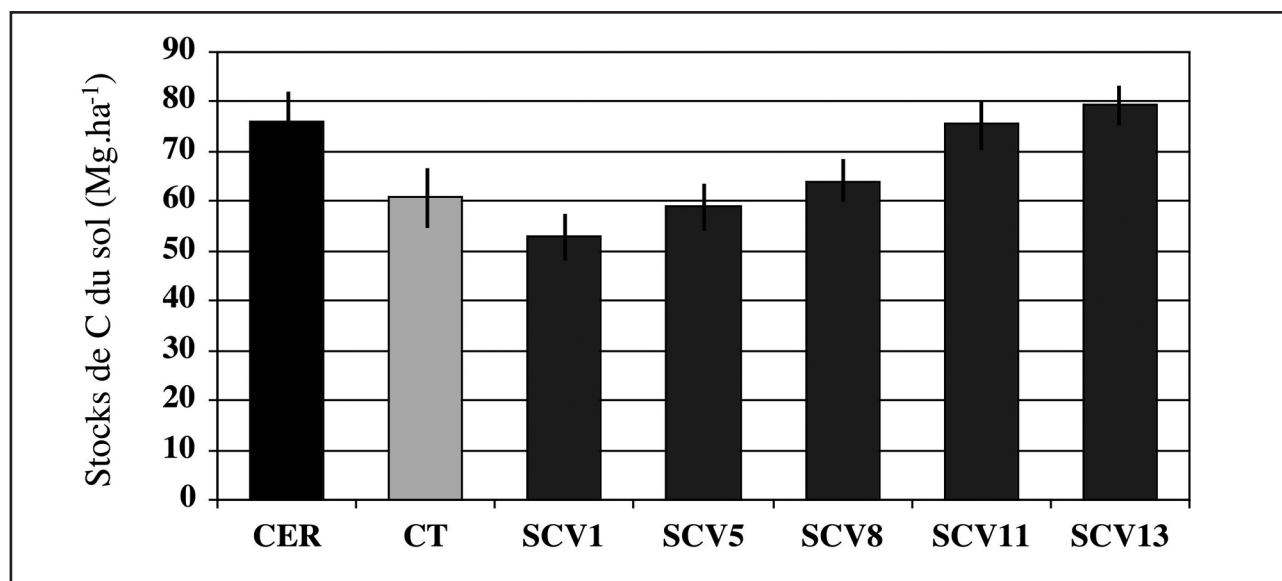


Figure 2 - Taux d'accumulation de carbone sous SCV. Les stocks de carbone sont calculés sur une base massique (premiers 400 kg.m⁻²).

Figure 2 - Carbon rate storage under SCV systems. Carbon stocks are calculated on an equivalent mass basis of the first 400 kg soil.m⁻².

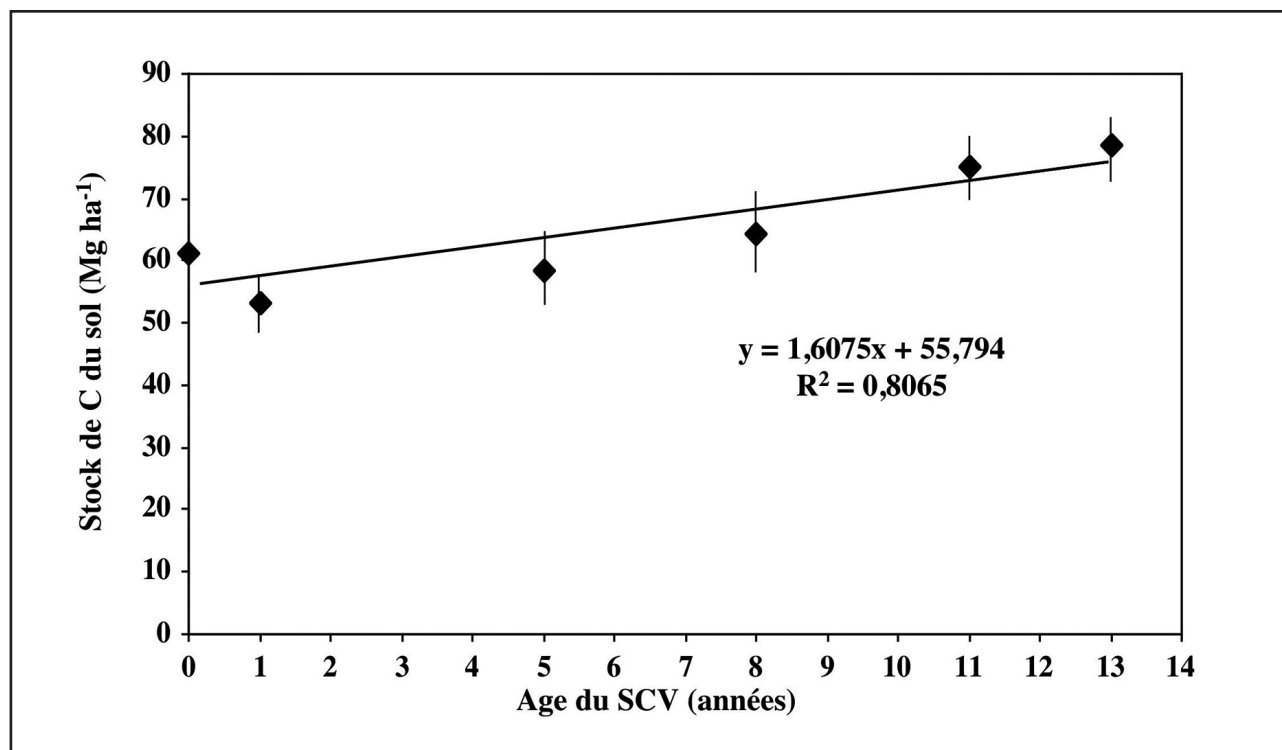


Figure 3 : Densité (ind.m⁻²) des différents taxons de macrofaune du sol dans les différentes situations étudiées (Légende voir tableau 1).
Figure 3 : Density (ind m⁻²) of main soil macrofauna taxa for the different studied situations (Legend see table 1).

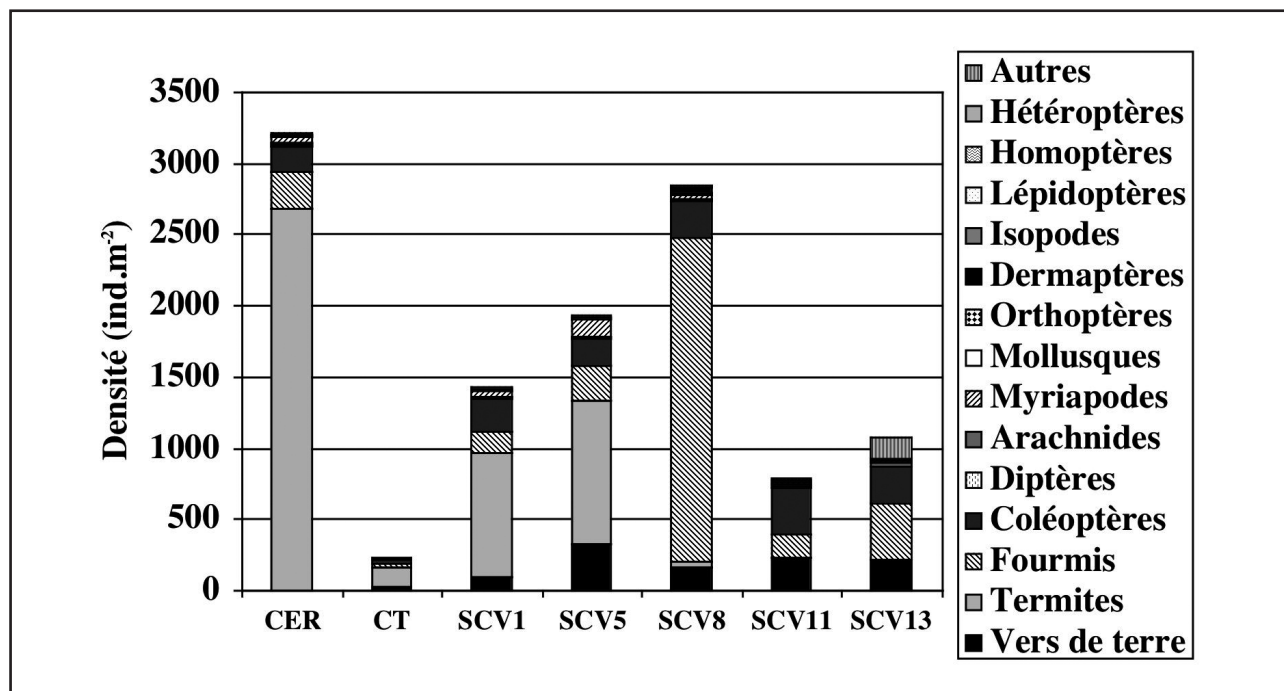


Figure 4 : Biomasse (g.m⁻²) des différents taxons de macrofaune du sol dans les différentes situations étudiées (Légende voir tableau 1).
Figure 4 : Biomass (g m⁻²) of soil macrofauna taxa for the different studied situations (Legend see table 1).

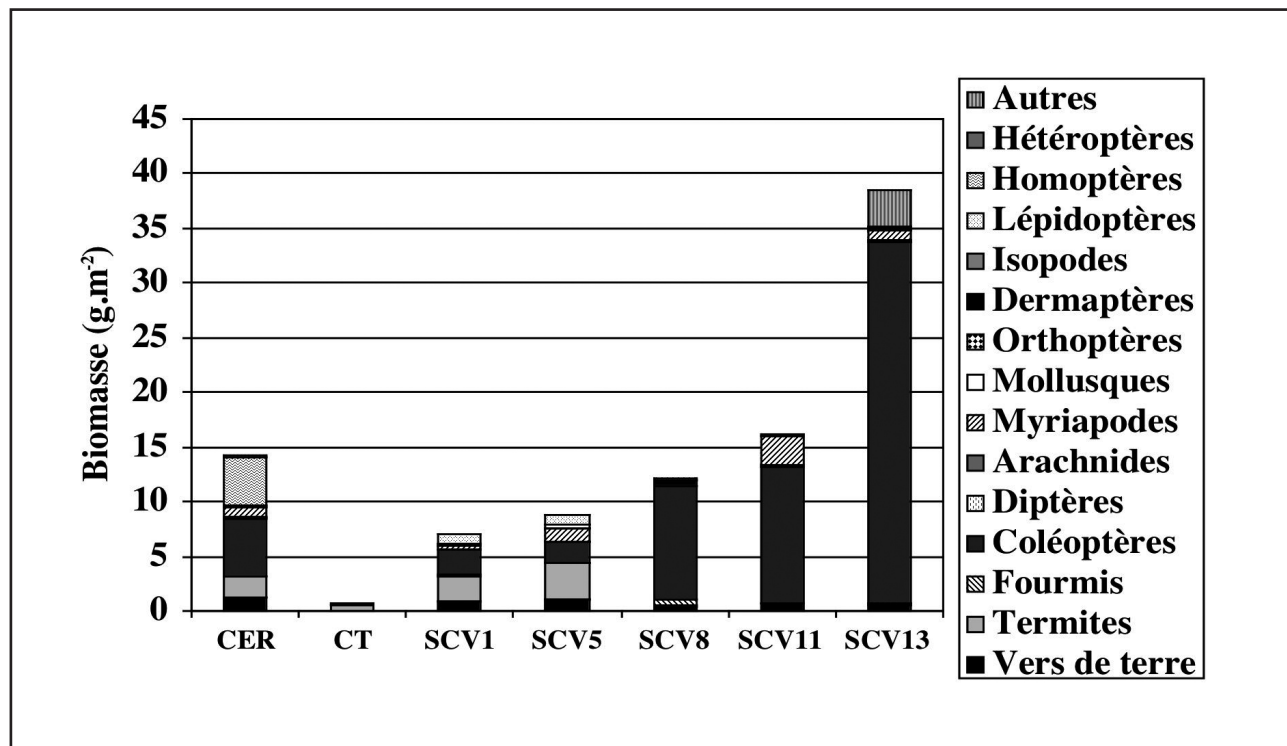
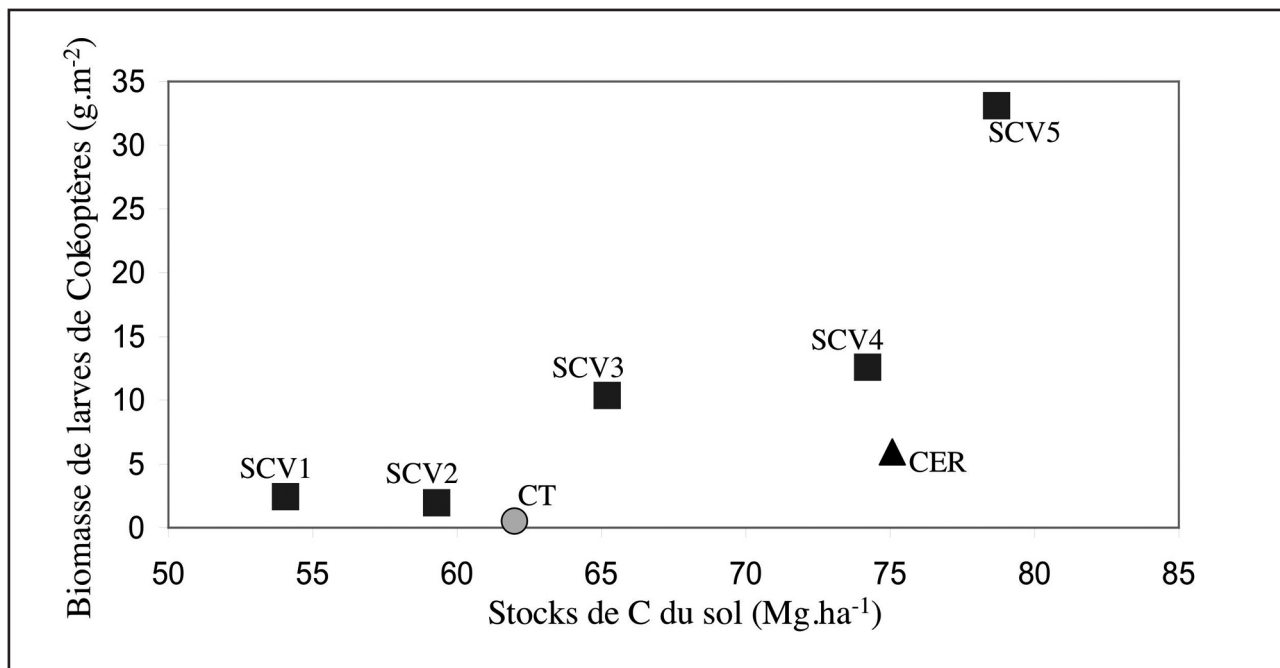


Figure 5 : Relation entre la biomasse de Coléoptères (g.m^{-2}) et le stock de carbone du sol (Mg.ha^{-1}) pour les différentes situations étudiées (Légende voir tableau 1).

Figure 5 : Relationships between the Coleoptera biomass (g.m^{-2}) and the soil carbon stock (Mg.ha^{-1}) for the different studied situations (Legend see table 1).



il apparaît que la densité totale est significativement plus élevée pour SCV que pour CT ($P < 0.05$).

Les biomasses moyennes sont de 14,2; 0,8; 7,1; 8,9; 12,1; 16,2 et 38,6 g.m^{-2} respectivement pour CER, CT, SCV1, SCV5, SCV8, SCV11, SCV13 (figure 4). Les biomasses de larves d'Homoptères (4,5 g.m^{-2}) et les Coléoptères (5,3 g.m^{-2}) sont plus élevées pour CER que pour les autres situations. Les biomasses de Coléoptères sont dominantes pour tous les SCV, excepté pour SCV5 où les biomasses de termites sont plus importantes. Dans SCV11 et SCV13, les biomasses de Coléoptères représentent respectivement 73 et 85 % de la biomasse totale. Que l'on considère les 6 monolithes échantillonnés à 0-30 cm ou les 9 monolithes échantillonnés à 0-10 cm, il existe des différences significatives ($P < 0.05$) et positives entre les biomasses de Dermaptères et de Coléoptères, et entre les biomasses de Dermaptères et de fourmis. Des différences significatives entre parcelles sont observées seulement pour les fourmis dont la biomasse est plus élevée pour SCV8 que pour toutes les autres parcelles ($P < 0.05$). Considérant la moyenne de toutes les situations SCV, la biomasse totale de macrofaune apparaît significativement plus élevée pour les SCV que pour CT ($P < 0.05$). Si l'on considère les seules situations SCV, une corrélation positive est également trouvée entre la biomasse de Coléoptères et le stock de C du sol (figure 5).

DISCUSSION

Les densités apparentes (DA) plus élevées pour les sols des situations SCV1, SCV5 et SCV8 peuvent s'expliquer soit par une teneur en sables plus élevée, soit par un effet du mode de gestion, lui-même à mettre en relation avec les teneurs en C, les biomasses et activités fauniques susceptibles de modifier fortement la porosité. Sur ce dernier point, Neves *et al.* (2003), pour des types de sols similaires au Brésil (Parana), ont bien montré les fortes variations de DA qui peuvent exister au sein d'un même profil de sol ou en fonction des traitements dans une comparaison systèmes de type CT ou de type SCV. L'analyse de régressions linéaires multiples (données non présentées) montre que DA n'est ni corrélée aux teneurs en C, ni aux indicateurs fauniques (densité ou biomasse).

Les variations de stocks de C à masse équivalente pour les différents traitements varient essentiellement pour la couche 0-20 cm. Les situations SCV d'âge 1 et 5 ans ont des stocks inférieurs à CT mais ils deviennent supérieurs pour les âges plus élevés. Il est clair, et c'est observé pour de très nombreuses situations dans d'autres contextes, que l'on ne peut observer une différenciation des stocks de C du sol sous l'effet d'alternatives de gestion qu'à des échelles pluriannuelles, voire décennales. Il faut attendre ici 8 ans pour noter des augmentations significatives de stocks de C sous l'effet de pratiques SCV.

Tableau 3 : Régression linéaire multiple entre les stocks de carbone du sol, la teneur en argile et l'âge des parcelles SCV. Légende: Beta = Coefficient standardisé de régression ou de régression partielle. ET = Erreur type.

Table 3: Multiple linear regression between soil carbon stock, clay content and age of the SCV plots. Legend: Beta = standardized regression or partial regression coefficient. ET = Standard error.

	Beta	ET de Beta	Coefficient	ET of Coefficient	t value (n =105)	Probabilité P
Intercept			31,87	7,01	4,55	1,5 10 ⁻⁵
Age	0,66	0,07	1,30	0,143	9,52	< 10 ⁻⁶
Clay content	0,24	0,07	0,42	0,12	3,44	8,4 10 ⁻⁴

Le stockage annuel de C de 1,3 à 1,6 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ observé pour cette situation du Brésil est élevé mais dans la gamme des valeurs publiées pour les Cerrados par Bernoux *et al.* (2006) qui varient de 0,4 à 1,7 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ pour la couche 0-40 cm. Le niveau de restitution en C au sol par les systèmes SCV étudiés a été estimé par simulation à l'aide du modèle G'DAY à 9,6 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹ (Corbeels *et al.*, 2006). Avec une valeur de stockage de 1,3 Mg C.ha⁻¹.an⁻¹, on calcule donc un taux d'humification des restitutions carbonées d'environ 14 %, une valeur un peu élevée mais non aberrante.

La teneur en C du sol et le taux d'accumulation dépendent aussi d'autres facteurs que l'âge des SCV et/ou le niveau de restitution, en particulier la texture du sol (Feller *et al.*, 1991 ; Feller et Beare, 1997). Aussi, une régression multiple a-t-elle été réalisée sur les situations SCV (CT considéré comme une situation SCV d'âge 0 mois) entre le stock de C des premiers 400 kg.m⁻² de sol et la teneur en argile et l'âge du SCV comme variables prédictives indépendantes. Ces deux variables sont corrélées significativement aux stocks de C (Tableau 3) mais la valeur du coefficient standardisé de régression est plus élevée pour la variable « âge » (0,66) que pour la variable « teneur en argile » (0,44). L'âge de la parcelle peut ainsi expliquer environ 44 % de la variabilité.

Dans la situation conventionnelle, la macrofaune du sol est caractérisée par des faibles densités et biomasses, si on compare à la situation naturelle (densité 14 fois moins importante et biomasse 18 fois plus faible). Ce résultat confirme les résultats généralement obtenus pour les vers de terre et les macroarthropodes (House and Parmelee, 1985, Fragozo *et al.*, 1999, Marasas *et al.*, 2001, Chevallier *et al.*, 2001, Decaëns *et al.*, 2004, Benito *et al.*, 2004). La perturbation du sol a généralement un impact négatif sur les populations d'invertébrés en raison d'un effet direct des outils de travail du sol et d'un effet indirect à travers la perte de matière organique et des changements dans la structure du sol et le régime hydrique (Chan *et al.*, 2001). Dans notre étude, l'installation de SCV a entraîné une augmentation significative de la densité et de la biomasse de la faune du sol et en particulier de certains taxons. La densité de vers de terre est plus élevée sous semis direct que sous travail conventionnel mais

n'augmente pas avec l'âge des parcelles, à la différence de l'étude réalisée par Brown *et al.* (2002) dans le Sud du Brésil. Dans notre étude, bien que presque tous les taxons présentent des densités et biomasses supérieures dans les SCV par rapport à CT, il n'y a pas de variation significative avec l'âge des SCV, excepté pour la biomasse de Coléoptères qui est significativement corrélée au stock de carbone et à l'âge du SCV (figure 5). Cette augmentation de la biomasse des Coléoptères n'est pas due à une augmentation du nombre d'individus mais à une augmentation de leur poids individuel (ce poids a augmenté de 6,5 mg dans CT à 132 mg dans SCV13). La disparition des termites après quelques années de SCV (à partir de SCV8) n'a, à notre connaissance, jamais été observée et il est difficile de l'expliquer.

Comme rapporté dans d'autres études, la biomasse, la densité et la diversité de la macrofaune du sol sont fortement augmentées dans les SCV, en comparaison avec les systèmes CT. Ceci peut modifier de façon importante le fonctionnement du sol et spécialement le stockage de C. La seule différence significative entre les situations SCV (comme un tout) et la situation CT a été notée pour les densités de vers de terre et de Coléoptères et pour les biomasses de Coléoptères. Dans notre étude, comme dans d'autres sites du Brésil (Brown *et al.*, 2001, données non publiées), les Coléoptères sont principalement des larves de Scarabeidae (communément appelés vers blancs). Au Brésil, il apparaît que certains de ces vers blancs peuvent être rhizophages (comme le genre *Phyllophaga*), certaines espèces peuvent être saprophages ou coprophages (*Cyclocephala*), et d'autres enfin peuvent être intermédiaires (*Diloboderus*). Sur nos sites d'étude, la forte biomasse de vers blancs, sans effets sur les racines (donc non rhizophages) ou sur la production végétale, suggère que la plupart de ces larves sont saprophages. Ces animaux ingèrent de la MOS (surtout des résidus) et, la mélangeant aux particules minérales, excrètent des déjections stables et forment des galeries. Cette activité peut conduire à la formation de « hot-spots » d'enrichissement du sol dans les 20 à 30 cm supérieurs avec des augmentations significatives en phosphore et en MOS (Faliniirina, 2006). Ces activités sont très proches de celles réalisées par les vers de terre qui sont connus pour affecter la dynamique à long terme de la MOS dans leurs

turricules par suite d'un effet de protection physique de la MOS contre la minéralisation (Martin, 1991). Ces vers blancs peuvent ainsi être considérés comme des ingénieurs du sol (Lavelle *et al.*, 1997).

CONCLUSION

Comparés aux systèmes traditionnels CT, les SCV fournissent un environnement idéal pour le rétablissement des populations d'ingénieurs du sol (vers de terre, vers blancs), d'ingénieurs de la litière (termites, fourmis, diplopodes) et de prédateurs (araignées, chilopodes), conduisant ainsi à une plus forte activité et régulation biologique dans les sols sous SCV. Cette forte activité, associée à une forte abondance des ingénieurs du sol et de la litière, la présence abondante de résidus de culture et l'absence de travail mécanique, peut expliquer l'augmentation des stocks de C mesurés dans ces systèmes de cultures. Des recherches complémentaires seront nécessaires pour relier le stockage du C à l'activité de la macrofaune du sol et spécialement des vers blancs dont l'activité nécessite d'être analysée.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM), le Ministère Français des Affaires Etrangères (MAE), la fondation Agrissus et la Fapesp. Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes ayant participé à cette étude, notamment lors des échantillonnages de macrofaune.

BIBLIOGRAPHIE

- Ab'Saber A.N., 1971 - A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras. In: III Simpósio sobre o Cerrado (Ferri MG, ed), Edgard Blucher, EDUSP, São Paulo, pp 1-14.
- Amundson R., 2001 - The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29, pp. 535-562.
- Anderson J.M., Ingram J.S.I., 1993 - *Tropical Soil Biology and Fertility: a handbook of methods*, 2nd ed. CAB International, Wallingford, pp. 44-46.
- Benito N.P., Brossard M., Pasini A., Guimaraes M.F., Bobillier B., 2004 - Transformations of soil macroinvertebrate populations after native vegetation conversion to pasture cultivation (Brazilian Cerrado). *Eur J Soil Biol.*, 40, pp. 147- 154.
- Bernoux M., Carvalho M.C.S., Volkoff B., Cerri C.C., 2002 - Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, pp. 888-896.
- Bernoux M., Cerri C.C., Cerri C.E.P. Siqueira Neto M., Metay A., Perrin A.S., Scopel E., Razafimbelo T., Blavet D., Piccolo M.C., Pavei M., Milne E., 2006 - Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 26, pp. 1-8.
- Blanchart E., Albrecht A., Brown G.G., Decaëns T., Duboisset A., Lavelle P., Mariani L., Roose E., 2004 - Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion: a review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 104, pp. 303-315.
- Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontonde A. and Feller C., 2006 - Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *Eur. J. Soil Biol.*, 42, pp. 136-144.
- Brown G.G., Benito N.P., Pasini A., Sautter K.D., Guimaraes M.F., Torres E., 2002 - No-tillage greatly increases earthworm populations in Parana state, Brazil. *Pedobiologia*, 47, pp. 764-771.
- Carter M.R., 2002 - Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*, 94, pp. 38-47.
- Chan K.Y., 2001 - An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. *Soil Till. Res.*, 57, pp. 179-191.
- Chevallier T., Blanchart E., Girardin C., Mariotti A., Albrecht A., Feller C., 2001 - The role of biological activity (roots, earthworms) in medium-term C dynamics under a *Digitaria decumbens* (Graminae) pasture. *Appl. Soil Ecol.*, 16, pp. 11-21.
- Corbeels, M., Scopel E., Cardoso A., Bernoux M., Douzet J.M., Siqueira Neto M., 2006 - Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biology*, 12, pp. 1773-1787.
- Decaëns T., Jiménez J.J., Barros E., Chauvel A., Blanchart E., Fragoso C., Lavelle P., 2004 - Soil macrofaunal communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 103, pp. 301-312.
- Ellert B.H., Bettany J.R., 1995 - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.*, 75, pp. 529-538.
- Ellert B.H., Janzen H.H., Entz T., 2002 - Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, pp. 1687-1695.
- Falinirina M.V., 2006 - Les ingénieurs du sol dans les systèmes à semis direct sous couverture végétale sur les Hautes-Terres malgaches : production et caractérisation des structures biogéniques. Mémoire de Master « Sols : organisation, fonctionnement et gestion » (Université Paris 6/ INA-PG). 16 p.

- Feller C., Fritsch E., Poss R., Valentin C., 1991 - Effets de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 26, pp. 25-36.
- Feller C., Beare M.H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79, pp. 69-116.
- Follet R.F., 2001 - Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Till. Res.*, 61, pp. 77-92.
- Fragoso C., Lavelle P., Blanchart E., Senapati B.K., Jimenez J.J., Martinez M., Decaëns T., Tondoh J., 1999 - Earthworm communities of tropical agroecosystems: origin, structure and influence of management practices. *In: Earthworm management in tropical agroecosystems* (P Lavelle, L Brussaard, P Hendrix, eds), CABI Publishing, pp. 27-56.
- House G.J., Parmelee R.W., 1985 - Comparison of soil arthropods and earthworms from conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Till. Res.*, 5, pp. 351-360.
- Klink C.A., Moreira A.G., Solbrig O.T., 1993 - Ecological impact of agricultural development in the Brazilian cerrado. *In: The World savannas - Economic driving forces, ecological constraints, and policy options for sustainable land use* (M.D.Young, O.T. Solbrig, eds), Man and Biosphere Series, Vol. 12, UNESCO, Paris, pp. 259-282.
- Lal R., 2002 - Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, 116, pp. 353-362.
- Lavelle P., Bignell D., Lepage M., Wolters V., Roger P., Ineson P., Heal O.W., Ghillion S., 1997 - Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.*, 33, pp. 159-193.
- Lavelle P., Spain A.V., 2001 - *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 654 p.
- Marasas M.E., Sarandon S.J., Cicchino A.C., 2001 - Changes in soil arthropod functional group in a wheat crop under conventional and no-tillage systems in Argentina. *Appl. Soil Ecol.*, 18, pp. 61-68.
- Martin A., 1991 - Short- and long-term effect of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of a tropical savanna, on soil organic matter. *Biol. Fert. Soils*, 11, pp. 234-238.
- Neves C.S., Feller C., Guimarães M.F., Medina C.C., Tavares Filho J., Fortier M., 2003 - Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey Oxisols. *Soil Till. Res.*, 71, pp. 109-119.
- Nye P.H., Greenland D.J., 1960 - *The Soil Under Shifting Cultivation*. Technical Comm. 51, Harpenden, England: Commonwealth Bureau of Soils, 156 p.
- Paustian K., Collins H.P., Paul E.A., 1997 - Management controls on soil carbon. *In: Soil organic matter in temperate agroecosystems. In: Soil organic matter in temperate agroecosystems* (EA Paul, K Paustian, ET Elliott, CV Cole, eds), CRC Press, Boca Raton, pp. 15-49.
- Siqueira Neto M., 2006 - Estoque de carbono e nitrogênio do solo com diferentes usos no Cerrado em Rio Verde (GO). Thèse Université de São Paulo, CENA, Piracicaba, Brésil.
- StatSoft France, 2001 - STATISTICA (data analysis software), version 7.1. www.statsoft.fr

